

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平10-309684

(43)公開日 平成10年(1998)11月24日

(51) Int.Cl.⁶
B 2 5 J 13/00

識別記号

F I
B 2 5 J 13/00

$$Z$$

審査請求 未請求 請求項の数6 O.L (全 17 頁)

(21)出願番号 特願平9-117036

(22)出願日 平成9年(1997)5月7日

(71)出題人 000006622

株式会社安川電機

福岡県北九州市八幡西区黒崎城石2番1号

(72) 發明者 安藤 慎悟

福岡県北九州市八幡西区黒崎城石2番1号

株式会社安川電機内

(72) 発明者 川辺 満徳

福岡県北九州市八幡西区黒崎城石2番1号

株式会社安川電機内

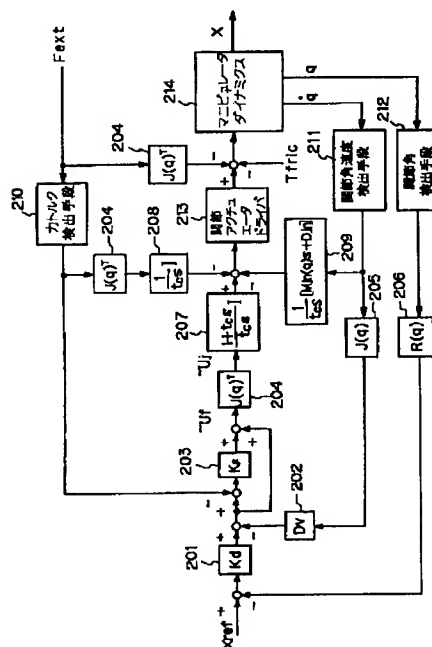
(74) 代理人 弁理士 若林 忠

(54) 【発明の名称】 マニピュレータのコンプライアンス制御方式

(57) 【要約】

【課題】 接触安定性と位置制御精度の両者共に良好なコンプライアンス制御系を実現すること。

【解決手段】 マニピュレータに力およびトルクのフィードバック制御を構成し、その上位に、位置、速度、加速のフィードバック制御を構成したことを特徴とするカトルクベースのコンプライアンス制御方式において、カトルクフィードバックループの内部に、非線形摩擦やマニピュレータの重力、各関節間の干渉力による等価外乱を推定するオブザーバを用いて上記外乱を相殺する補償器を付加したことを特徴とするマニピュレータのカトルクベース・コンプライアンス制御方式。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 マニピュレータに力およびトルクのフィードバック制御を構成し、その上位に、位置、速度、加速度のフィードバック制御を構成したことを特徴とするカトルクベースのコンプライアンス制御方式において、カトルクフィードバックループの内部に、非線形摩擦やマニピュレータの重力、各関節間の干渉力による等価外乱を推定するオブザーバを用いて上記外乱を相殺する補償器を付加したことを特徴とするマニピュレータのカトルクベース・コンプライアンス制御方式。

【請求項2】 マニピュレータの先端の位置、速度、加速度信号および先端に加わる外力を計測または推定する手段を有し、マニピュレータの先端の運動を、先端の位置、速度、加速度信号および先端に加わる外力信号と、作業に応じて値を設定する仮想慣性、仮想粘性、仮想剛性に基づいて表されるインピーダンス特性式から計算される運動に一致するように制御を行うコンプライアンス制御方式において、前記インピーダンス特性式を超平面（切替え平面）とするスライディングモード制御を構成することによって、マニピュレータ先端に仮想的なインピーダンスを実現することを特徴とするマニピュレータのコンプライアンス制御方式。

【請求項3】 マニピュレータ先端の位置、速度、加速度信号または先端に加わる外力信号をローパスフィルタによってフィルタリングした新たな位置、速度、加速度信号または外力信号に対してインピーダンス特性式を設定することを特徴とする請求項2に記載のマニピュレータのコンプライアンス制御方式。

【請求項4】 アクチュエータ部とリンク部が有限の剛性を有する動力伝達機構を介して結合されているロボットマニピュレータの制御方式であり、アクチュエータ部の位置、速度、リンク部の位置、速度、加速度およびマニピュレータの先端に加わる外力信号を検出あるいは推定する手段を有し、マニピュレータの先端の運動を、先端の位置、速度、加速度および先端に加わる外力信号と、作業に応じて値を設定する仮想慣性、仮想粘性、仮想剛性に基づいて表されるインピーダンス特性式から計算される運動に一致するように制御を行うコンプライアンス制御方式において、アクチュエータ部の位置とリンク部の位置の偏差を、ロボットマニピュレータへの新たな外部カトルク指令の動力伝達機構の剛性分の1に収束させる制御を構成することを特徴とするロボットマニピュレータのカトルクベース・コンプライアンス制御方式。

【請求項5】 マニピュレータ先端に加わる外力フィードバックの外側にリンク部の位置、速度フィードバック

を構成するカトルクベース・コンプライアンス制御方式におけるカトルク指令をローパスフィルタによってフィルタリングした信号を、新たな外部カトルク指令とすることを特徴とする請求項4に記載のロボットマニピュレータのカトルクベース・コンプライアンス制御方式。

【請求項6】 アクチュエータ部の位置とリンク部の位置の偏差が、新たな外部カトルク指令の動力伝達機構の剛性分の1に収束するようなスライディングモード制御を構成することを特徴とする請求項4または5に記載のロボットマニピュレータのカトルクベース・コンプライアンス制御方式。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明はマニピュレータと環境との接触を伴う作業において、マニピュレータのコンプライアンス制御方式に関する。

【0002】

【従来の技術】 従来、環境との接触を伴うマニピュレータの力制御方式として、コンプライアンス制御方式が開発されている。コンプライアンス制御方式は、マニピュレータの手先の外力に対する動特性が望みの機械インピーダンス（慣性、粘性、剛性）を有するような制御をソフトウェアにより実現するものである。コンプライアンス制御方式の内の一つに、マニピュレータに位置（速度）制御系を構成し、その上位にインピーダンスモデルを付加し、そのインピーダンスモデルを用いて下位の位置（速度）制御系に位置（速度）指令を与える方式がある。例えば文献「計測自動制御学会論文集Vol. 24, No. 1, 55/62, 1988」にみられる古田、小菅らの方式は位置ベースのコンプライアンス制御方式である（以下、位置ベース・コンプライアンス制御と呼ぶ）。また、特公平4-43744号公報にみられる方式は速度ベースのコンプライアンス制御方式である（以下、速度ベース・コンプライアンス制御と呼ぶ）。

【0003】 マニピュレータの手先位置ベクトルを $P = [p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_n]^T$ ($n \leq 6$)、その目標値ベクトルを $P_{ref} = [p_{r1}, p_{r2}, \dots, p_{ri}, \dots, p_{rn}]^T$ 、マニピュレータの手先が環境に与える力ベクトルを $f_e = [f_{e1}, f_{e2}, \dots, f_{ei}, \dots, f_{en}]^T$ とすると、位置（速度）ベース・コンプライアンス制御は、マニピュレータの手先に取り付けられた力検出手段あるいは推定手段によって得られる f_e 、マニピュレータの位置検出手段によって検出される P 、および計算機内部の P_{ref} から、

【0004】

【数1】

$$M_d (\ddot{P} - \ddot{P}_{ref}) + D_d (\dot{P} - \dot{P}_{ref}) + K_d (P - P_{ref}) = -f_e \quad (1)$$

$$M_d \ddot{P} + D_d (\dot{P} - \dot{P}_{ref}) + K_d (P - P_{ref}) = -f_e \quad (2)$$

$$M_d \ddot{P} + D_d \dot{P} + K_d (P - P_{ref}) = -f_e \quad (3)$$

【0005】などのインピーダンス特性式を満足するマニピュレータの位置（速度）ベクトルを計算し、その値を位置（速度）指令値ベクトルとして下位の位置（速度）制御系に与える。このように、インピーダンス特性式は式(1)～(3)のように様々なタイプがある。式(1)～(3)において M_d , D_d , K_d はそれぞれ慣性、粘性、剛性を表す正定対称行列である。一方、文献「ロボット工学ハンドブック p.254, 日本ロボット学会, 1990, コロナ社」にみられる方式は、位置あるいは速度ベース・コンプライアンス制御方式とは異なり、まず、マニピュレータに力およびトルクのフィードバック制御を構成し、そ

$$M(q) \ddot{P} + D(q) \dot{P} + S(q, \dot{q}) + f_e = u_f \quad (4)$$

【0008】 $q = [q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_n]'$ は関節変数ベクトル、 $u_f = [u_{f1}, u_{f2}, \dots, u_{fi}, \dots, u_{fn}]'$ は制御入力ベクトルである。 $M(q)$, $D(q)$ はそれぞれマニピュレータの慣性行列、粘性行列である。 $S(q, dq/dt)$ はマニピュレータの重力、関節間の遠心力・コリオリ力、非線形摩擦

$$u_j = J(q)' u_f$$

が成り立つ。ここで $J(q)$ はマニピュレータのヤコビ行列である。カトルクベース・コンプライアンス制御では、まず、つぎのようなカトルクフィードバック制御を構成

$$u_f = f_{cmd} + K_f (f_{cmd} - f_e)$$

ここで、 f_{cmd} , K_f はそれぞれ力指令値ベクトル、カトルクフィードバックゲイン行列である。式(4), (6)より、 f_{cmd} に対するマニピュレータの応答は、

$$(I + K_f)^{-1} M(q) \ddot{P} + (I + K_f)^{-1} D(q) \dot{P} + (I + K_f)^{-1} S(q, \dot{q}) = f_{cmd} - f_e \quad (7)$$

【0011】となる。ここで、 I は単位行列を表す。さらに、力指令 f_{cmd} を位置、速度、加速度のフィードバックにより、

$$f_{cmd} = K_d (P_{ref} - P) - D_v \dot{P} - M_a \ddot{P} \quad (8)$$

【0013】と構成すると、式(7), (8)より、マニピュレータの手先に加わる外力 $-f_e$ に対するマニピュレータの応答は、

$$((I + K_f)^{-1} M(q) + M_a) \ddot{P} + ((I + K_f)^{-1} D(q) + D_v) \dot{P} + K_d (P - P_{ref}) + (I + K_f)^{-1} S(q, \dot{q}) = -f_e \quad (9)$$

【0015】となる。式(9)よりカトルクフィードバックゲイン行列 K_f 、速度フィードバックゲイン行列 D_v 、加速度フィードバックゲイン行列 M_a を調節することにより、マニピュレータの仮想慣性、仮想粘性を任意ではないがある程度自由に設定できる。また、位置フィードバックゲイン行列 K_d によって仮想剛性は任意に設定できる。

【0016】

【発明が解決しようとする課題】位置、速度ベース・コンプライアンス制御は位置、速度制御系をベースにして

の上位に位置、速度、加速度などのフィードバックループを構成することにより、マニピュレータの仮想的な慣性、粘性、剛性（仮想慣性、仮想粘性、仮想剛性）を調節するカトルクベースのコンプライアンス制御方式である（以下、カトルクベース・コンプライアンス制御と呼ぶ）。

【0006】作業空間で表したマニピュレータの運動方程式はつぎのように表される。

【0007】

【数2】

摩擦を表す項である。制御入力 u_f は各関節に設けられたアクチュエータの発生力（トルク）によって生ずるマニピュレータ手先での発生力（モーメント）を表している。すなわち、関節駆動力（トルク）を $u_j = [u_{j1}, u_{j2}, \dots, u_{ji}, \dots, u_{jn}]'$ とすると、

(5)

する。

【0009】

(6)

【0010】

【数3】

【0012】

【数4】

【0014】

【数5】

いるため位置制御精度は良い。しかし、マニピュレータの手先が剛性の高い環境に接触した場合、位置、速度制御系の位相遅れのためにインピーダンスモデルの仮想粘性を小さく設定すると、接触が不安定になるという問題がある。一方、カトルクベース・コンプライアンス制御は、位置、速度ベース・コンプライアンス制御に比べてより小さな仮想粘性に対して接触は安定となる。しかし、非線形摩擦や重力の影響により、位置制御精度が悪いという問題がある。また、アクチュエータ部とリンク

部が減速機などの動力伝達機構を介して結合されたロボットマニピュレータでは、減速機の剛性に起因するマニピュレータの機械的共振の影響によりコンプライアンス制御系の接触安定性が劣化し、従来のカトルクベース・コンプライアンス制御においても十分な接触安定性が保証されないという問題がある。したがって、従来のコンプライアンス制御方式では、接触安定性と位置制御精度の両者に良好なコンプライアンス制御系を実現できないという問題がある。

【0017】

【課題を解決するための手段】本発明は、上記従来技術の問題点を解決するために、マニピュレータに力およびトルクのフィードバック制御を構成し、その上位に、位置、速度、加速度のフィードバック制御を構成したことを特徴とするカトルクベースのコンプライアンス制御方式において、カトルクフィードバックループの内部に、非線形摩擦やマニピュレータの重力、各関節間の干渉力による等価外乱を推定するオブザーバを用いて上記外乱を相殺する補償器を付加したことを特徴とするものである。本発明は、また、マニピュレータの先端の位置、速度、加速度信号および先端に加わる外力を計測または推定する手段を有し、マニピュレータの先端の運動を、先端の位置、速度、加速度信号および先端に加わる外力信号と、作業に応じて値を設定する仮想慣性、仮想粘性、仮想剛性に基づいて表されるインピーダンス特性式から計算される運動に一致するように制御を行うコンプライアンス制御方式において、インピーダンス特性式を超平面（切替え平面）とするスライディングモード制御を構成することによって、マニピュレータ先端に仮想的なインピーダンスを実現することを特徴とする。

【0018】また、本発明は、アクチュエータ部とリンク部が有限の剛性を有する動力伝達機構を介して結合されているロボットマニピュレータの制御方式であり、アクチュエータ部の位置、速度、リンク部の位置、速度、加速度およびマニピュレータの先端に加わる外力信号を検出あるいは推定する手段を有し、マニピュレータの先端の運動を、先端の位置、速度、加速度および先端に加

$$M_m \ddot{x}_m + D_m \dot{x}_m + K_g (x_m - x_l) = u_f \quad (10)$$

$$M_l \ddot{x}_l + D_l \dot{x}_l + K_g (x_l - x_m) + f_e = 0 \quad (11)$$

【0022】また、エンドエフェクタ3と環境8との接点で成り立つ。

（実施例1）つぎに、本発明の実施例である制御系の構

$$e_x = x_m - x_l$$

とおく。ここで、偏差 e_x が新たな制御入力 v に対して、超平面 $W = 0$ を

$$W = \dot{e}_x + C (e_x - v / K_g),$$

【0024】とするスライディングモードが生じるように制御入力 u_f を設計する。ただし、 C は正のスカラ定数

わる外力信号と、作業に応じて値を設定する仮想慣性、仮想粘性、仮想剛性に基づいて表されるインピーダンス特性式から計算される運動に一致するように制御を行うコンプライアンス制御方式において、アクチュエータ部の位置とリンク部の位置の偏差を、ロボットマニピュレータへの新たな外部カトルク指令の動力伝達機構の剛性の1に収束させる制御することを特徴とする。

【0019】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施の形態を図面を参照して説明する。まず、減速機を有するロボットマニピュレータについて簡単に説明する。図3(a)はアクチュエータ部とリンク部が減速機によって結合された1自由度ロボットマニピュレータの概略図を表している。同図において、1はアクチュエータ、2はリンク、3はエンドエフェクタ、4は減速機、5はアクチュエータ部の位置、速度検出器、6はリンク部の位置、速度、加速度検出器、7はエンドエフェクタに加わる外力の検出器である。減速機4の剛性のために減速後のアクチュエータ回転角とリンク回転角にはねじりが生じる。ここで、図3(b)のように、エンドエフェクタ3が環境8に接触している場合を考える。ただし、アクチュエータ1のステータと環境8は作業空間に固定されているものとする。このとき、接触点近傍での1自由度ロボットマニピュレータの運動は図5のようにモデル化できる。

【0020】図5において21はアクチュエータ部の慣性 M_m 、22はアクチュエータ部の粘性摩擦係数 D_m 、23はリンク部の慣性 M_l 、24はリンク部の粘性摩擦係数 D_l 、25は減速機の剛性 K_g 、26は環境の剛性 K_o 、27はアクチュエータ発生力 u_f 、28はエンドエフェクタ3が環境8に与える力 f_e を表している。ここで、アクチュエータ部の位置、速度検出器5から計算されるエンドエフェクタの微小変位を x_m 、リンク部の位置、速度、加速度検出器6から得られるエンドエフェクタの微小変位を x_l とおくと、図5のモデルはつぎの数式で表される。

【0021】

【数6】

触点を微小変位 x_m, x_l の原点とすると、

$$(12)$$

成について説明する。2つの微小変位 x_m と x_l の偏差を

$$(13)$$

【0023】

【数7】

$$C > 0 \quad (14)$$

である。式(14)において、アクチュエータ部の位置 x_m とリンク部の位置 x_l の偏差 e_x が新たな外部トルク指令 v の

動力伝達機構の剛性分の1 (1/Kg) に収束するよに超平面を設定している。スライディングモードが生じているときの1自由度ロボットマニピュレータについては、

$$M\ddot{x}_1 + D\dot{x}_1 + K_g(x_1 - x_m) + f_e = 0 \quad (15)$$

$$\dot{e}x + C(e x - v/K_g) = 0 \quad (16)$$

【0026】となる。式(16)をラプラス変換すると
【0027】

$$Ex = \frac{C}{s+C} \frac{V}{K_g} \quad (17)$$

【0028】となる。C [rad/s]より十分低い周波数帯域ではex = v/Kg すなわち、
【0029】
【数10】
が成り立つ。1自由度ロボットマニピュレータの新たな制御入力vに対する応答は、式(15), (17)より次のようになる。

$$(Ms^2 + Ds) X_1 + Fe = \frac{C}{s+C} V \quad (19)$$

【0030】ここで、Vを

$$V = K_f(f_{cmd} - f_e) + f_{cmd} \quad (20)$$

【0031】

$$f_{cmd} = K_d(x_{ref} - x_1) - Dv \dot{x}_1 \quad (21)$$

【0032】のように、マニピュレータ先端に加わる外力フィードバックの外側にリンク部の位置、速度フィードバックを構成するカトルクベース・コンプライアンス制御におけるカトルク指令とする。ここで、Kf, Dv, Kdはそれぞれカフィードバックゲイン、速度フィードバツ

式(11), (14)の応答は

【0025】

【数8】

【数9】

帯域ではex = v/Kg すなわち、

(18)

【0029】

【数10】

【数11】

クゲイン、位置フィードバックゲインである。式(19), (20), (21)より、外力 -fe (図5参照) に対する1自由度ロボットマニピュレータの応答は、

【0033】

【数12】

$$\begin{aligned} & \frac{M}{1+K_f} s^2 X_1 + \left(\frac{D}{1+K_f} + \frac{C}{s+C} Dv \right) s X_1 + \frac{C}{s+C} K_d (X_1 - X_{ref}) \\ & = - \left(\frac{1}{1+K_f} + \frac{C}{s+C} \frac{K_f}{1+K_f} \right) F_e \end{aligned} \quad (22)$$

【0034】となり、ロボットマニピュレータの機械的共振が抑えられていることがわかる。また、式(22)はC [rad/s]より十分低い周波数帯域では、

$$\frac{M}{1+K_f} \ddot{x}_1 + \left(\frac{D}{1+K_f} + Dv \right) \dot{x}_1 + K_d (x_1 - x_{ref}) = -f_e \quad (23)$$

【0036】となる。ただし、xrefはエンドエフェクタの微小変位x1の目標軌道である。式(23)はインピーダンス特性式そのものである。式(12), (22)より、xref = 0とすると接触系のブロック線図は図4のように表される。図4において、11は1自由度マニピュレータの応

【0035】

【数13】

答式(22)を示すブロック、12は環境の剛性Koを表すブロックである。図4の接触系が安定となる必要十分条件は

【0037】

【数14】

$$C \left(C + \frac{D}{M} \right) \left[\frac{D}{M} + \frac{Dv}{M} (1+K_f) \right] > C(1+K_f) \frac{K_d}{M} + \left(C K_f - \frac{D}{M} \right) \frac{K_0}{M} \quad (24)$$

【0038】となる。環境の剛性Koが有限であれば、Cを大きくすることによって接触安定条件の式(24)が満足されることがわかる。以上の手段により、減速機などの動力伝達機構の剛性に起因するマニピュレータの機械的共振が抑圧されたカトルクベース・コンプライアンス制御が構成されるため、従来のコンプライアンス制御系に比べて接触安定性が良く実用的なコンプライアンス制御

が実現できる。つぎに、式(14)を超平面とするスライディングモードを生じさせる制御入力ufを求める。なお、図1は制御系全体のブロック線図である。式(10), (11), (13), (14), (20), (21)より、制御入力ufを

【0039】

【数15】

$$u_f = h_e \dot{x}_e + h_m \dot{x}_m + h_l \dot{x}_l + h_r \dot{x}_{ref} + h_{f1} \dot{x}_e + h_{f2} \dot{x}_e \quad (25)$$

【0040】とおくと、 $W \, dW/dt$ はつぎようになる。【数16】

【0041】

$$\begin{aligned} W \, \dot{W} = & \frac{1}{M_m} \left[\left\{ h_e - K_g \left(1 + \frac{M_m}{M_l} \right) + \frac{C \, M_m (1 + K_f) D_v}{M_l} \right\} W \, \dot{x}_e \right. \\ & + (h_m - D_m + C \, M_m) W \, \dot{x}_m \\ & + \left\{ h_l - \frac{M_m (C \, M_l - D_l)}{M_l} - \frac{C \, M_m (1 + K_f) (M_l K_d - D_l D_v)}{M_l K_g} \right\} W \, \dot{x}_l \\ & + \left\{ h_r - \frac{C \, M_m (1 + K_f) K_d}{K_g} \right\} W \, \dot{x}_{ref} \\ & + \left\{ h_{f1} - \frac{C \, M_m (1 + K_f) D_v}{M_l K_g} + \frac{M_m}{M_l} \right\} W \, \dot{x}_e \\ & \left. + \left(h_{f2} + \frac{C \, M_m K_f}{K_g} \right) W \, \dot{x}_e \right] \quad (26) \end{aligned}$$

【0042】したがって、

【0043】

$h_e < K_g (1 + M_m/M_l) - C \, M_m (1 + K_f) D_v / M_l$ if $W \, \dot{x}_e > 0$

【数17】

$h_e > K_g (1 + M_m/M_l) - C \, M_m (1 + K_f) D_v / M_l$ if $W \, \dot{x}_e < 0$

$h_m < D_m - M_m C$ if $W \, \dot{x}_m > 0$

$h_m > D_m - M_m C$ if $W \, \dot{x}_m < 0$

$h_l < M_m (C \, M_l - D_l) / M_l - C \, M_m (1 + K_f) (M_l K_d - D_l D_v) / (M_l K_g)$ if $W \, \dot{x}_l > 0$

$h_l > M_m (C \, M_l - D_l) / M_l - C \, M_m (1 + K_f) (M_l K_d - D_l D_v) / (M_l K_g)$ if $W \, \dot{x}_l < 0$

$h_r < C \, M_m (1 + K_f) K_d / K_g$ if $W \, \dot{x}_{ref} > 0$

$h_r > C \, M_m (1 + K_f) K_d / K_g$ if $W \, \dot{x}_{ref} < 0$

$h_{f1} < C \, M_m (1 + K_f) D_v / (M_l K_g) - M_m / M_l$ if $W \, \dot{x}_e > 0$

$h_{f1} > C \, M_m (1 + K_f) D_v / (M_l K_g) - M_m / M_l$ if $W \, \dot{x}_e < 0$

$h_{f2} < -C \, M_m K_f / K_g$ if $W \, \dot{x}_e > 0$

$h_{f2} > -C \, M_m K_f / K_g$ if $W \, \dot{x}_e < 0$

(27)

【0044】を満足するように式(25)の各ゲインを切り替えることによって、 $W \, dW/dt < 0$ が成り立ち、スライディングモードが生じる。制御系全体のブロック線図は図1ようになる。図1において、101はロボットマニピュレータのダイナミクス(10)、(11)、102は環境の剛性である。103は位置フィードバックゲイン(仮想剛性) K_d 、104は速度フィードバックゲイン(仮想粘性を調節するゲイン) D_v 、105は力フィードバックゲイン K_f 、106は微分演算器である。107は超平面(14)の計算部、108aは式(27)に基づくフィードバックゲインの切替え演算部である。109、110、112、113、113aはそれぞれ \dot{x}_e 、 \dot{x}_m 、 \dot{x}_l 、 \dot{x}_{ref} 、 \dot{x}_e のフィードバックゲインである。111は \dot{x}_e のフィードバックゲインである。111は \dot{x}_e のフィードバックゲインである。

ref/dtのフィードフォワードゲインである。114、115、116、117、118はそれぞれロボットマニピュレータ先端に加わる外力の検出器、アクチュエータ部の位置 x_m の検出器、アクチュエータ部の速度 \dot{x}_m の検出器、リンク部の位置 x_l の検出器、リンク部の速度 \dot{x}_l の検出器である。

【0045】超平面の計算部107はVの値と式(14)に基づいてWの値を計算する。切替え演算部108aはWの値と式(27)に基づいて各フィードバックゲイン109～113、113aの値を変更する。また、リンク部の加速度が検出できる場合は、制御入力 u_f を

【0046】

【数18】

$$u_f = h_e \dot{x}_e + h_m \dot{x}_m + h_{l1} \ddot{x}_l + h_{l2} \dot{x}_l + h_r \ddot{x}_{ref} + h_f \dot{x}_e \quad (28)$$

【0047】とおくと、 $W \, dW/dt$ は
【0048】

【数19】

$$\begin{aligned} W \, \dot{W} = & \frac{1}{Mm} [(h_e - K_g) W \, e_x + (h_m - D_m + C \, Mm) W \, \dot{x}_m \\ & + \left\{ h_{l1} - C \, Mm + \frac{C \, Mm(1+K_f)K_d}{K_g} \right\} W \, \dot{x}_l \\ & + \left\{ h_{l2} - Mm + \frac{C \, Mm(1+K_f)D_v}{K_g} \right\} W \, \ddot{x}_l \\ & + \left\{ h_r + \frac{C \, Mm(1+K_f)K_d}{K_g} \right\} W \, \dot{x}_{ref} + \left\{ h_f + \frac{C \, Mm \, K_f}{K_g} \right\} W \, \dot{f}_e] \end{aligned} \quad (29)$$

【0049】となるから、
 $h_e < K_g$ if $W \, e_x > 0$
 $h_e > K_g$ if $W \, e_x < 0$

【0050】
【数20】

$$\begin{aligned} h_m &< D_m - C \, Mm \text{ if } W \, \dot{x}_m > 0 \\ h_m &> D_m - C \, Mm \text{ if } W \, \dot{x}_m < 0 \\ h_{l1} &< C \, Mm - C \, Mm (1+K_f) K_d / K_g \text{ if } W \, \dot{x}_l > 0 \\ h_{l1} &> C \, Mm - C \, Mm (1+K_f) K_d / K_g \text{ if } W \, \dot{x}_l < 0 \\ h_{l2} &< Mm - C \, Mm (1+K_f) D_v / K_g \text{ if } W \, \ddot{x}_l > 0 \\ h_{l2} &> Mm - C \, Mm (1+K_f) D_v / K_g \text{ if } W \, \ddot{x}_l < 0 \\ h_r &< -C \, Mm (1+K_f) K_d / K_g \text{ if } W \, \dot{x}_{ref} > 0 \\ h_r &> -C \, Mm (1+K_f) K_d / K_g \text{ if } W \, \dot{x}_{ref} < 0 \\ h_f &< -C \, Mm \, K_f / K_g \text{ if } W \, \dot{f}_e > 0 \\ h_f &> -C \, Mm \, K_f / K_g \text{ if } W \, \dot{f}_e < 0 \end{aligned} \quad (30)$$

【0051】を満足するように式(28)の各ゲインを切り替えれば良い。このときの制御系全体のブロック線図は図2のようになる。式(29)、(30)より、リンク部の加速度信号を用いることによってリンク部の慣性 M_l 、粘性摩擦係数 D_l の値がわからなくても、制御系を構成することができる。図2において108b、112b、119はそれぞれ式(30)に基づくゲイン切替え演算部、リンク部の加速度のフィードバックゲイン、リンク部の加速度の検出器である。他の要素については図1と全く同じであ

る。また、ここでは1自由度ロボットマニピュレータについての実施形態を示したが、多自由度ロボットマニピュレータについても全く同様の方法で制御系を構成することができる。

(実施例2) 本発明の実施例2について説明する。

【0052】マニピュレータの関節空間での運動方程式を

【0053】
【数21】

$$M_j(q) \ddot{q} + D_j \dot{q} + T_{fric} + T_{ext} = u_j \quad (31)$$

【0054】おく。ここで、 $M_j(q)$ 、 D_j はそれぞれ関節空間でのマニピュレータの慣性行列、粘性行列である。 T_{fric} は関節空間での非線形摩擦ベクトル、 T_{ext} はマニピ

ュレータの手先が環境に与える力ベクトル(トルクも含む) F_{ext} によって関節に生じるトルクであり、

$$T_{fric} = J(q)' F_{fric}, \quad T_{ext} = J(q)' F_{ext} \quad (32)$$

が成り立つ。慣性行列 $M_j(q)$ 、粘性行列 D_j の公称値(ノミナル値：パラメータ同定によって求める)を $M_{jn}(q)$ 、 D_{jn} とおく。また、マニピュレータの関節速度ベクトル

を $y = dq/dt$ とおく。式(31)からマニピュレータの非線形摩擦をつぎのように推定する。

$$\hat{T}_{fric}(s) = Flt(s) [u_j(s) - T_{ext}(s) - \{M_{jn}(q)s + D_{jn}\} Y(s)] \quad (33)$$

ここで、 $\hat{}$ は推定値であることを表す。 $Flt(s)$ は、推定値の高周波成分を除去するローパスフィルタ行列である。

【0055】式(33)より推定された非線形摩擦 $\hat{T}_{fric}(s)$ を用いて、制御入力 u_j をつぎのように構成する。

$$u_j(s) = \hat{T}_{fric}(s) + \hat{T}_{fric}(s) \quad (34)$$

式(33), (34)より外乱オブザーバを用いた非線形摩擦の補償器は、図6に示すような構成となる。図6において、215はマンピュレータの慣性力と粘性摩擦力の計算部、216はローパスフィルタ、217はヤコビ行列の転置行列、218はマンピュレータ手先に加わるカトルク検出手段、219はマンピュレータの関節角速度検出手段、220は関節アクチュエータのトルクを制御す

$$\begin{aligned} u_j(s) = \{I - Flt(s)\}^{-1} \bar{u}_j(s) - \{I - Flt(s)\}^{-1} Flt(s) Text(s) \\ - \{I - Flt(s)\}^{-1} Flt(s) \{Mjn(q)s + Djn\} Y(s) \end{aligned} \quad (35)$$

【0058】と表さる。カトルクベース・コンプライア

$$\bar{u}_f = Fcmd + Kf(Fcmd - Fext) \quad (36)$$

【0059】

$$Fcmd = Kd(Pref - P) - Dv \dot{P} - Ma \ddot{P} \quad (37)$$

【0060】と構成する。 \bar{u}_j を式(5)と同様にマンピ

$$\bar{u}_j = J(q)' \bar{u}_f \quad (38)$$

と構成する。ローパスフィルタ行列を

【0061】

$$Flt(s) = \frac{1}{1+tc s} I \quad tc: \text{ローパスフィルタの時定数} \quad (39)$$

【0062】と設定すると、式(35)~(39)より、外乱オブザーバによる非線形摩擦補償器を内部に持つカトルクベース・コンプライアンス制御系のブロック線図は図7のように表される。図7は本発明の実施例2における制御ブロック図である。図7において、201、202、203はそれぞれ、位置フィードバックゲイン、速度フィードバックゲイン、力フィードバックゲインである。204、205、206はそれぞれ、マンピュレータのヤコビ行列の転置行列、ヤコビ行列、マンピュレータの順キネマティクス変換行列である。207、208、209はそれぞれ、マンピュレータの関節駆動力指令の比例積分器、外力による関節トルクの積分器、マンピュレータの慣性力および粘性摩擦力の積分値の計算部である。210、211、212、213、214はそれぞれ、マンピュレータ手先に加わるカトルク検出手段、マンピュレータの関節角速度検出手段、マンピュレータの関節角検出手段、マンピュレータ関節アクチュエータのドライバ（トルク制御器）、マンピュレータのダイナミ

$$Mn(q) = J(q)'^{-1} Mjn(q) J(q)^{-1} \quad Dn(q) = J(q)'^{-1} Djn J(q)^{-1} \quad (40)$$

【0065】と表される。式(33), (34)の非線形摩擦の

$$\hat{F}fric(s) = Flt(s) [\bar{u}_f(s) - Fext(s) - \{ Mn(q)s + Dn(q) \} Z(s)] \quad (41)$$

$$\bar{u}_f(s) = \bar{u}_f(s) + \hat{F}fric(s) \quad (42)$$

と構成し、 \bar{u}_f を新たな制御入力としてカトルクベース・コンプライアンス制御を構成すればよい。ただし、 z は $z=dX/dt$ である（マンピュレータの作業空間での速度ベクトル）。実施例2と同様に、マンピュレータの減速効果が大きく、作業空間での等方性が良い場合には、 $Mn(q)$, $Dn(q)$ をある位置、姿勢で線形近似して求め、定

$$W = Dd \dot{P} + Kd(P - Pref) + \bar{u}_{fe} \quad (43)$$

るドライバ、221はマンピュレータのダイナミクスである。

【0056】ここで、式(34)の \bar{u}_j を新たな制御入力とみなして前述のカトルクベース・コンプライアンス制御を構成する。式(33), (34)より制御入力 u_j は、

【0057】

【数22】

ンス制御を式(6), (8)と同様に、

【数23】

ュレータのヤコビ行列を用いて、

【数24】

クスである。図7の207~209が図6の外乱トルク補償器に相当する。ただし、図7の制御系では加速度フィードバックゲインを零行列としている。 $Mj(q)$ はマンピュレータの位置、姿勢によって変化するが、産業用マンピュレータでは減速機の効果により慣性行列の対角要素が非対角要素に比べて優勢となるため、 $Mjn(q)$ を対角行列に近似して計算量を低減することができる。また、 $Mjn(q)$ をある位置、姿勢で線形化近似して求め、定数行列として等価外乱補償器を構成してもよい。

（実施例3）実施例2では外乱オブザーバによる非線形摩擦、重力項の補償器を関節空間で構成したが、同様にしてその補償器を作業空間で構成することもできる。

【0063】マンピュレータの作業空間での慣性行列、粘性行列の公称値 $Mn(q)$, $Dn(q)$ はマンピュレータの関節空間での慣性行列、粘性行列の公称値 $Mjn(q)$, $Djn(q)$ により

【0064】

【数25】

数行列として等価外乱補償器を構成することもできる。

（実施例4）スライディングモード制御における $W=0$ を

【0066】

【数26】

【0067】で表されるインピーダンス特性式とし、仮想粘性行列 D_d 、仮想剛性行列 K_d は対角行列

$$D_d = \text{diag}[dd1, dd2, \dots, ddi, \dots, ddn] \quad (44)$$

$$K_d = \text{diag}[kd1, kd2, \dots, kdi, \dots, kdn] \quad (45)$$

とする。 \bar{f}_e は、 f_e をローパスフィルタ行列式

$$F_{lt} = \text{diag}[1/(t_1 s + 1), 1/(t_2 s + 1), \dots, 1/(t_n s + 1)] \quad (46)$$

によってフィルタリングした力ベクトルである。ただし、 \bar{f}_e も十分大きく設定する。マニピュレータの軌跡に沿って常に、ローパスフィルタのカットオフ周波数は kdi/ddi 以下とする。

$$d(W'W)/dt < 0 \quad (47)$$

が成り立つときスライディングモードが生じ、マニピュレータの軌跡は超平面 $W=0$ に収束し、そこに拘束される。式(47)を満足するように制御則を決定する。

$$W = [w1, w2, \dots, wi, \dots, wn]' \quad (48)$$

【0069】 【数27】

$$wi = ddi \dot{p}_i + kdi (p_i - p_{ri}) + \bar{f}_{ei} \quad (49)$$

【0070】このとき、 $d(W'W)/dt$ は 【数28】

【0071】

$$d(W'W)/dt = 2(w1 \dot{w}_1 + w2 \dot{w}_2 + \dots + wn \dot{w}_n) \quad (50)$$

【0072】と表せる。式(4)、(43)より dW/dt を計算するとつぎようになる。 【0073】
【数29】

$$\begin{aligned} \dot{W} &= D_d \ddot{P} + K_d \dot{P} - K_d \dot{P}_{ref} + \bar{f}_e \\ &= D_d M(q)^{-1} (u_f - D(q) \dot{P} - S(q, \dot{q}) - f_e) + K_d \dot{P} - K_d \dot{P}_{ref} + \bar{f}_e \\ &= D_d [M(q)^{-1} u_f + (D_d^{-1} K_d - M(q)^{-1} D(q)) \dot{P} - D_d^{-1} K_d \dot{P}_{ref} - M(q) f_e \\ &\quad + D_d^{-1} \bar{f}_e - M(q)^{-1} S(q, \dot{q})] \end{aligned} \quad (51)$$

【0074】制御入力 u_f を

$$u_f = M(q) \hat{u}_f + f_e \quad (52)$$

$\hat{u}_f = [\hat{u}_{f1}, \hat{u}_{f2}, \dots, \hat{u}_{fi}, \dots, \hat{u}_{fn}]'$ 【0075】

とおくと、 dW/dt は新たな制御入力 \hat{u}_f に関して対角 【数30】

化される。このとき、 dwi/dt は

$$\begin{aligned} \dot{w}_i &= ddi [\hat{u}_{fi} + (kdi/ddi - \{M(q)^{-1} D(q)\}_{ii}) \dot{p}_i - kdi/ddi \dot{p}_{ri} \\ &\quad + 1/ddi \bar{f}_{ei} - \sum_{j=1, j \neq i}^n \{M(q)^{-1} D(q)\}_{ij} \dot{p}_j - \{M(q)^{-1} S(q, \dot{q})\}_i] \end{aligned} \quad (53)$$

【0076】となる。新たな制御入力 \hat{u}_{fi} を 【数31】

【0077】

$$\begin{aligned} \hat{u}_{fi} &= hvi1 \dot{p}_1 + hvi2 \dot{p}_2 + \dots + hvin \dot{p}_n + hri \dot{p}_{ri} \\ &\quad + hfi \bar{f}_{ei} + hsi \text{sgn}(wi) \end{aligned} \quad (54)$$

【0078】とおくと、式(53)、(54)より 【数32】

【0079】

$$\begin{aligned} \dot{w}_i \dot{w}_i &= ddi [hvi1 + kdi/ddi - \{M(q)^{-1} D(q)\}_{ii}] \dot{w}_i \dot{p}_i \\ &\quad + ddi [hri - kdi/ddi] \dot{w}_i \dot{p}_{ri} + ddi [hfi + 1/ddi] \dot{w}_i \bar{f}_{ei} \\ &\quad + ddi \sum_{j=1, j \neq i}^n [hvi1 - \{M(q)^{-1} D(q)\}_{ij}] \dot{w}_i \dot{p}_j \\ &\quad + ddi [hsi |w_i| - \{M(q)^{-1} S(q, \dot{q})\}_i] \dot{w}_i \end{aligned} \quad (55)$$

【0080】が成り立つ。したがって、 【数33】

【0081】

$$\begin{aligned}
&h_{vij} < \{M(q)^{-1}D(q)\}_{ij} - k_{di}/d_{di} \text{ if } w_i \dot{p}_i > 0 \\
&h_{vij} > \{M(q)^{-1}D(q)\}_{ij} - k_{di}/d_{di} \text{ if } w_i \dot{p}_i < 0 \\
&h_{vij} < \{M(q)^{-1}D(q)\}_{ij}, j \neq i \text{ if } w_i \dot{p}_j > 0 \\
&h_{vij} > \{M(q)^{-1}D(q)\}_{ij}, j \neq i \text{ if } w_i \dot{p}_j < 0 \\
&h_{ri} < k_{di}/d_{di} \text{ if } w_i \dot{p}_{ri} > 0 \\
&h_{ri} > k_{di}/d_{di} \text{ if } w_i \dot{p}_{ri} < 0 \\
&h_{fi} < -1/d_{di} \text{ if } w_i \dot{f}_{ei} > 0 \\
&h_{fi} > -1/d_{di} \text{ if } w_i \dot{f}_{ei} < 0 \\
&h_{si} < -\| \{M(q)^{-1}S(q, \dot{q})\}_i \|
\end{aligned} \tag{56}$$

【0082】を満足するように式(54)の各ゲインを切替えることによって、 $w_i dw_i/dt < 0$ が成り立つ。このとき、式(50)より式(47)が成り立ち、マニピュレータの運動は超平面（インピーダンス特性式）に完全に拘束される。マニピュレータの運動が超平面に拘束されているときは、常に接触安定性が保証される。つまり、外力信号

$$M(q) = J(q)^{-1} M_j(q) J(q)^{-1} \tag{57}$$

【0084】と表されるので、式(5)の関節駆動力 u_j は制御入力 \hat{u}_f を用いてつぎのように構成すればよい。

$$u_j = M_{jn}(q) J(q)^{-1} \hat{u}_f + J(q)^{-1} f_e \tag{58}$$

【0086】式(54)より \hat{u}_f を
【0087】

$$\begin{aligned}
\hat{u}_f &= H_v \dot{P} + H_r \dot{P}_{ref} + H_f \dot{f}_e + H_s \\
H_v &= [h_{vij}] \\
H_r &= \text{diag}[h_{r1}, h_{r2}, \dots, h_{r1}, \dots, h_{rn}] \\
H_f &= \text{diag}[h_{f1}, h_{f2}, \dots, h_{f1}, \dots, h_{fn}] \\
H_s &= [h_{s1} \text{sgn}(w_1), h_{s2} \text{sgn}(w_2), \dots, h_{si} \text{sgn}(w_i), \dots, h_{sn} \text{sgn}(w_n)]'
\end{aligned} \tag{59}$$

(60)

【0088】とおくと、制御系の一構成例は図8のブロック図のように表せる。図8において、301は仮想粘性 D_d と仮想剛性 K_d のインピーダンスパラメータ設定部、302は式(43)の超平面の演算部、303は式(56)で表されるフィードバックゲインの切替え演算部である。インピーダンスパラメータ D_d, K_d が変更されると、演算部302および303も変更される。304は微分演算器である。305は dP_{ref}/dt のフィードフォワードゲイン H_r 、306は $d\dot{f}_e/dt$ のフィードバックゲイン H_f 、307は非線形摩擦、重力、関節間干渉力の補償入力 H_s 、308は dP/dt のフィードバックゲイン H_v である。309は式(58)に見られるマニピュレータの手先加速度指令 \hat{u}_f から関節アクチュエータ発生力（トルク）指令への変換行列である。310はヤコビ行列の転置行列であり、手先作用力（モーメント）から関節作用力（トルク）への変換を行う。311はヤコビ行列であり、関節速度 dq/dt から手先速度 dP/dt への変換を行う。312は順キネマティクス変換行列 $R(q)$ である。313は力モーメント検出手段、314は関節アクチュエータのドラ

\dot{f}_e の微分値をフィードバックすることによって、接触安定性すなわち環境に接触しているときの超平面への収束性を保証している。作業空間でのマニピュレータの慣性行列 $M(q)$ は、関節空間での慣性行列 $M_j(q)$ を用いて、

【0083】

【数34】

【0085】

【数35】

【数36】

イバ、315は関節速度検出手段、316は関節位置検出手段である。317は式(4)で表されるマニピュレータのダイナミクス、318はマニピュレータが接触する環境のダイナミクスである。319はローパスフィルタである。超平面の演算部302は式(43)に基づいて W の値を計算する。切替え演算部303は W の値を式(56)に基づいて各フィードバックゲイン305～308の値を変更する。

【0089】この方式では、外力信号の微分値を必要とする。力センサによって検出される外力信号には比較的大きなノイズが含まれることが多いため、外力信号をローパスフィルタによってフィルタリングした信号 \dot{f}_e を用いる。実際に制御系を構成する際には、パラメータ同定によって得られた $M(q), D(q), S(q, dq/dt)$ の公称値 $M_n(q), D_n(q), S_n(q, dq/dt)$ を用いるが、演算量を軽減するために、

【0090】

【数37】

$$\{M_n(q)^{-1}D_n(q)\}_{ij}, \{M_n(q)^{-1}S_n(q, \dot{q})\}_i$$

【0091】の最大値と最小値を見積もり、式(56)を満足する2種類の各定数ゲインを予め定めておくこともできる。アクチュエータの減速比が大きなマニピュレータでは $M(q)$, $D(q)$ の対角項は非対角項に比べてかなり優勢であるから、非対角項を無視し、 $h_{vij}, j \neq i$ をゼロとして制御則をさらに簡略化してもよい。その際、 h_{si} の絶対値を大きめに設定して無視した非対角項の不確かさに対するロバスト安定性を高めるとよい。また、減速比が大きい場合は $M_{jn}(q)$ を対角行列で近似することもでき

$$T^{-1}\ddot{X} + \dot{X} = X, T = \text{diag} [tf_1, tf_2, \dots, tf_i, \dots, tf_n] \quad (61)$$

【0093】によってフィルタリングされたマニピュレータ手先の位置 \bar{P} 、目標位置 \bar{P}_{ref} 、速度 \dot{P} 、加速度 \ddot{P} 、外力 \bar{f}_e に対して、超平面 $W = 0$ を

$$W = M_d \ddot{P} + D_d \dot{P} + K_d (\bar{P} - \bar{P}_{ref}) + \bar{f}_e \quad (62)$$

【0095】と設定し、スライディングモードが生じるように制御系を設計する。仮想慣性行列 M_d は対角行列

$$M_d = \text{diag} [md_1, md_2, \dots, md_i, \dots, md_n] \quad (63)$$

とする。スライディングモードが生じ、マニピュレータの運動が超平面に拘束されているときは常に、

$$M_d \ddot{P} + D_d \dot{P} + K_d (P - P_{ref}) = -\bar{f}_e \quad (64)$$

【0097】が成り立つ。式(61), (62) より、 W はつぎのように表される。

$$W = M_d T^{-1} \ddot{P} + (-M_d T^{-2} + D_d T^{-1}) \dot{P} + (M_d T^{-2} - D_d T^{-1} + K_d) \bar{P} - K_d \bar{P}_{ref} + \bar{f}_e \quad (65)$$

【0099】実施例4と同様に W を n 個の超平面に分割すると、 w_i はつぎのようになる。

$$w_i = md_i / tf_i \dot{p}_i + (-md_i / tf_i^2 + ddi / tf_i) \dot{p}_i + (md_i / tf_i^2 - ddi / tf_i + kdi) \bar{p}_i - kdi \bar{p}_{ref} + \bar{f}_{ei} \quad (66)$$

【0101】ここで、実施例1と同様に制御入力 u_f を式(52)のようにおいて、式(4), (65)より dW/dt を計算すると以下のようになる。

$$\begin{aligned} \dot{W} &= M_d T^{-1} \dot{M}(q)^{-1} (\dot{M}(q) \dot{u}_f - D(q) \dot{P} - S(q, \dot{q})) + (-M_d T^{-2} + D_d T^{-1}) \dot{P} \\ &\quad + (M_d T^{-2} - D_d T^{-1} + K_d) \bar{P} - K_d \bar{P}_{ref} + \dot{\bar{f}}_e \\ &= M_d T^{-1} [\dot{u}_f + (-M(q)^{-1} D(q) - T^{-1} + M_d^{-1} D_d) \dot{P} \\ &\quad + (T^{-1} - M_d^{-1} D_d + M_d^{-1} K_d T) \bar{P} - M_d^{-1} K_d T \bar{P}_{ref} \\ &\quad + M_d^{-1} T \dot{\bar{f}}_e - M(q)^{-1} S(q, \dot{q})] \end{aligned} \quad (67)$$

【0103】よって、 dW/dt はつぎのようになる。

【数44】

【0104】

$$\begin{aligned} \dot{w}_i &= md_i / tf_i [\dot{u}_{fi} + (-\{M(q)^{-1} D(q)\}_{ii} - 1 / tf_i + ddi / md_i) \dot{p}_i \\ &\quad + (1 / tf_i - ddi / md_i + kdi \cdot tf_i / md_i) \bar{p}_i - kdi \cdot tf_i / md_i \bar{p}_{ref} \\ &\quad + tf_i / md_i \dot{\bar{f}}_{ei} - \sum_{j=1, j \neq i}^n \{M(q)^{-1} D(q)\}_{ij} \dot{p}_j - \{M(q)^{-1} S(q, \dot{q})\}_i] \end{aligned} \quad (68)$$

【0105】制御入力を

【数45】

【0106】

る。さらに、近似して定数行列とすることもできるが、超平面への収束性を保証するためには、 h_{si} の絶対値をかなり大きく設定する必要があり、保守的になってしまう。

(実施例5)

ローパスフィルタ

【0092】

【数38】

【0094】

【数39】

【0096】

【数40】

【0098】

【数41】

$$\begin{aligned} \dot{\bar{u}}_f = & h_{v1} \dot{\bar{p}}_1 + h_{v2} \dot{\bar{p}}_2 + \dots + h_{vn} \dot{\bar{p}}_n + l_{v1} \dot{\bar{p}}_1 + h_{r1} \dot{\bar{p}}_1 \\ & + h_{f1} \dot{\bar{f}}_e + h_{s1} \operatorname{sgn}(\dot{\bar{w}}_1) \end{aligned} \quad (69)$$

【0107】とおくと、 $\dot{\bar{w}}_i$ $d\dot{\bar{w}}_i/dt$ はつぎのようにな

【0108】

【数46】

$$\begin{aligned} \dot{\bar{w}}_i = & m_{di}/t_{fi} [h_{vii} - \{M(q)^{-1}D(q)\}_{ii} - 1/t_{fi} + d_{di}/m_{di}] \dot{\bar{w}}_i \dot{\bar{p}}_i \\ & + m_{di}/t_{fi} [l_{vi} + 1/t_{fi} - d_{di}/m_{di} + k_{di} t_{fi}/m_{di}] \dot{\bar{w}}_i \dot{\bar{p}}_i \\ & + m_{di}/t_{fi} [h_{ri} - k_{di} t_{fi}/m_{di}] \dot{\bar{w}}_i \dot{\bar{p}}_i \\ & + m_{di}/t_{fi} [h_{fi} + t_{fi}/m_{di}] \dot{\bar{w}}_i \dot{\bar{f}}_e \\ & + m_{di}/t_{fi} \sum_{j=1, j \neq i}^n [h_{vij} - \{M(q)^{-1}D(q)\}_{ij}] \dot{\bar{w}}_i \dot{\bar{p}}_j \\ & + m_{di}/t_{fi} [h_{si} |\dot{\bar{w}}_i| - \{M(q)^{-1}S(q, \dot{q})\}_i \dot{\bar{w}}_i] \end{aligned} \quad (70)$$

【0109】式(70)より、
【0110】

【数47】

$$\begin{aligned} h_{vii} & < \{M(q)^{-1}D(q)\}_{ii} + 1/t_{fi} - d_{di}/m_{di} \text{ if } \dot{\bar{w}}_i \dot{\bar{p}}_i > 0 \\ h_{vii} & > \{M(q)^{-1}D(q)\}_{ii} + 1/t_{fi} - d_{di}/m_{di} \text{ if } \dot{\bar{w}}_i \dot{\bar{p}}_i < 0 \\ h_{vij} & < \{M(q)^{-1}D(q)\}_{ij}, j \neq i \text{ if } \dot{\bar{w}}_i \dot{\bar{p}}_j > 0 \\ h_{vij} & > \{M(q)^{-1}D(q)\}_{ij}, j \neq i \text{ if } \dot{\bar{w}}_i \dot{\bar{p}}_j < 0 \\ l_{vi} & < -1/t_{fi} + d_{di}/m_{di} - k_{di} t_{fi}/m_{di} \text{ if } \dot{\bar{w}}_i \dot{\bar{p}}_i > 0 \\ l_{vi} & > -1/t_{fi} + d_{di}/m_{di} - k_{di} t_{fi}/m_{di} \text{ if } \dot{\bar{w}}_i \dot{\bar{p}}_i < 0 \\ h_{ri} & < k_{di} t_{fi}/m_{di} \text{ if } \dot{\bar{w}}_i \dot{\bar{p}}_i > 0 \\ h_{ri} & > k_{di} t_{fi}/m_{di} \text{ if } \dot{\bar{w}}_i \dot{\bar{p}}_i < 0 \\ h_{fi} & < -t_{fi}/m_{di} \text{ if } \dot{\bar{w}}_i \dot{\bar{f}}_e > 0 \\ h_{fi} & > -t_{fi}/m_{di} \text{ if } \dot{\bar{w}}_i \dot{\bar{f}}_e < 0 \\ h_{si} & < -|\{M(q)^{-1}S(q, \dot{q})\}_i| \end{aligned} \quad (71)$$

【0111】を満足するように式(69)の各ゲインを切替えることによって、式(47)が満足され、マニピュレータの運動は超平面（インピーダンス特性式）に拘束される。実施例4と同様に、マニピュレータの運動が超平面に拘束されているときは、常に接触安定性が保証される。実施例5では、実施例4とは異なり、インピーダンス特性式に仮想慣性による加速度項が含まれている。□

一パスフィルタによってフィルタリングされた位置、速度、加速度、外力信号に対して超平面を定義することによって、実際の加速度信号を用いずにマニピュレータの仮想慣性を制御することができる。式(69)より

【0112】

【数48】

$$\dot{\bar{u}}_f = H_v \dot{\bar{P}} + L_v \dot{\bar{P}} + H_r \dot{\bar{P}}_{ref} + H_f \dot{\bar{f}}_e + H_s \quad (72)$$

$$L_v = \operatorname{diag} [l_{v1}, l_{v2}, \dots, l_{vi}, \dots, l_{vn}] \quad (73)$$

【0113】とおくと、制御系の一構成例は図9のブロック図のように表せる。ただし、 H_v, H_r, H_f, H_s の定義は式(60)と同じである。図9において、301は仮想慣性 M_d 、仮想粘性 D_d 、仮想剛性 K_d のインピーダンスパラメータ設定部、302は式(65)の超平面の演算部、303は式(71)で表されるフィードバックゲインの切替え演算部である。305は $d\dot{\bar{P}}_{ref}/dt$ のフィードフォワードゲイン H_r 、320は $d\dot{\bar{P}}/dt$ のフィードバックゲイン L_v である。319は式(61)のローパスフィルタである。他の

要素については実施例4と全く同じである。実際に制御系を構成する際の

【0114】

【数49】

$$\{M_n(q)^{-1}D_n(q)\}_{ij}, \{M_n(q)^{-1}S_n(q, \dot{q})\}_i$$

【0115】および式(5)の関節駆動力 u_j の構成法や近似処理についても、実施例4と同様のことがいえる。

【0116】

【発明の効果】本発明によれば、アクチュエータ部の位

置とリンク部の位置の偏差を、マニピュレータ先端に加わる外力フィードバックの外側にリンク部の位置、速度フィードバックを構成するカトルクベース・コンプライアンス制御におけるカトルク指令をローパスフィルタによりフィルタリングした信号の動力伝達機構の剛性分の1に収束させる制御を構成することによって、減速機などの動力伝達機構の剛性に起因するマニピュレータの機械的共振が抑圧されたカトルクベース・コンプライアンス制御が構成されるため、従来のコンプライアンス制御系に比べて接触安定性が良く実用的なコンプライアンス制御が実現できるという効果がある。本発明によれば、トルクベース・コンプライアンス制御のカトルクフィードバックループの内部に、非線形摩擦やマニピュレータの重力による外乱を推定するオブザーバを用いて上記外乱を相殺する補償器を付加したので、常に安定で精度の良い接触作業が実現できるという効果がある。

【0117】また、本発明によれば、マニピュレータの先端の位置、速度、加速度信号および外力信号と、作業に応じて値を設定する仮想慣性、仮想粘性、仮想剛性に基づいて表されるインピーダンス特性式を超平面（切替え平面）とするスライディングモード制御を構成することによって、マニピュレータ先端の仮想的なインピーダンスを実現するため、常に安定で精度の良い接触作業が実現できるという効果がある。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施の形態における制御系のブロック線図

【図2】本発明の実施の形態における制御系のブロック線図

【図3】（a）アクチュエータ部とリンク部が減速機で結合された1自由度ロボットマニピュレータの概略図

（b）アクチュエータ部とリンク部が減速機で結合された1自由度ロボットマニピュレータと接触する環境を表す図

【図4】本発明実施時の接触系のブロック線図

【図5】アクチュエータ部とリンク部が減速機で結合された1自由度ロボットマニピュレータのモデル図

【図6】本発明の実施例における等価外乱補償器のブロック図

【図7】本発明の実施例における制御ブロック図

【図8】本発明の実施例における制御系のブロック図

【図9】本発明の実施例における制御系のブロック図

【符号の説明】

1：アクチュエータ

2：リンク

3：エンドエフェクタ

4：減速機

5：アクチュエータ部の位置、速度検出器

6：リンク部の位置、速度、加速度検出器

7：エンドエフェクタに加わる外力の検出器

8：エンドエフェクタが接触する環境

11：本発明実施時のマニピュレータの応答（22）を表すブロック

12：環境の剛性を表すブロック

21：アクチュエータ部の慣性

22：アクチュエータ部の粘性摩擦係数

23：リンク部の慣性

24：リンク部の粘性摩擦係数

25：減速機の剛性

26：環境の剛性

27：アクチュエータの発生力

28：マニピュレータのエンドエフェクタが環境に与える力

101：アクチュエータ部とリンク部が減速機を介して結合されたロボットマニピュレータのダイナミクス

102：環境の剛性

103：リンク部の位置フィードバックゲイン（仮想剛性）

104：リンク部の速度フィードバックゲイン（仮想粘性を調節するゲイン）

105：カトルクフィードバックゲイン

106：微分演算器

107：超平面Wの計算部

108a：式（27）に基づくフィードバックゲインの切替え演算部

108b：式（30）に基づくフィードバックゲインの切替え演算部

109：アクチュエータ部位置とリンク部位置の偏差のフィードバックゲイン

110：アクチュエータ部の速度フィードバックゲイン

111：目標速度指令のフィードフォワードゲイン

112：リンク部の速度フィードバックゲイン

112b：リンク部の加速度フィードバックゲイン

113：外力の時間微分のフィードバックゲイン

113a：外力のフィードバックゲイン

114：外力の検出器

115：アクチュエータ部位置の検出器

116：アクチュエータ部速度の検出器

117：リンク部位置の検出器

118：リンク部速度の検出器

119：リンク部加速度の検出器

201：位置フィードバックゲイン行列

202：速度フィードバックゲイン行列

203：カトルクフィードバックゲイン行列

204：マニピュレータのヤコビ行列の転置

205：マニピュレータのヤコビ行列（関節速度から手先速度への変換行列）

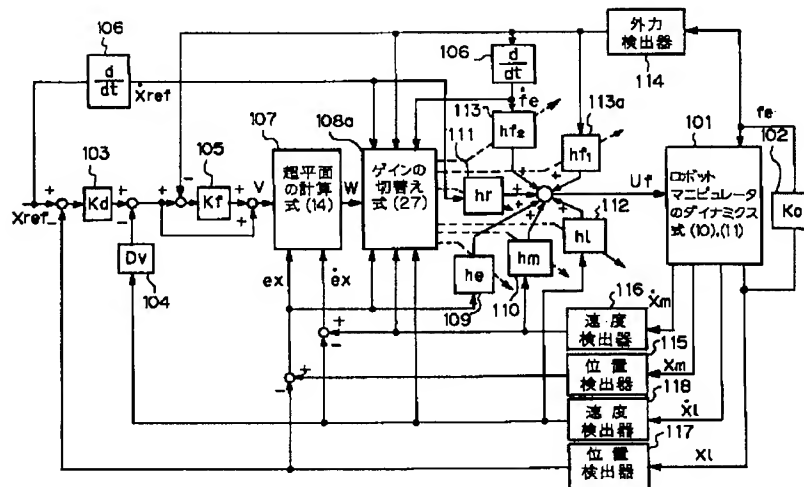
206：マニピュレータの順キネマティクス変換行列

207：関節駆動力指令の比例積分器

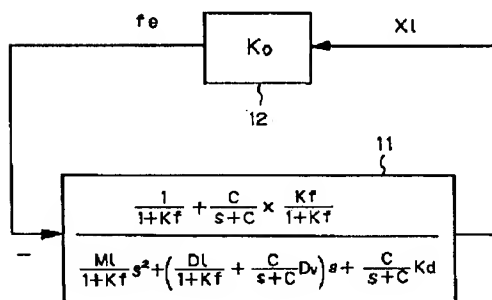
208：外力による関節トルクの積分器

- 209: 関節角速度の比例積分器
 210: カトルク検出手段
 211: 関節角速度検出手段
 212: 関節角検出手段
 213: 関節アクチュエータのドライバ
 214: マニピュレータのダイナミクス
 215: マニピュレータのダイナミクス計算部
 216: ローパスフィルタ行列
 217: マニピュレータのヤコビ行列の転置
 218: カトルク検出手段
 219: 関節角速度検出手段
 220: 関節アクチュエータのドライバ
 221: マニピュレータのダイナミクス
 301: インピーダンスパラメータMd, Dd, Kdの設定部
 302: 超平面Wの演算部
 303: フィードバックゲインの切替え演算部
 304: 微分演算器
 305: dP_{ref}/dt あるいは dR_{ref}/dt のフィードフォワードゲインHr
 306: $d^{-1}f_e/dt$ のフィードバックゲインHv
 307: 非線形摩擦、重力、関節間干渉力の補償入力Hs
 308: dP/dt のフィードバックゲインHv
 309: マニピュレータの手先加速度指令 \hat{u}_f から関節アクチュエータ発生力(トルク) 指令への変換行列
 310: ヤコビ行列の転置行列、手先作用力(モーメント) から関節作用力(トルク) への変換
 311: ヤコビ行列、関節速度 dq/dt から手先速度 dP/dt への変換
 312: 順キネマティクス変換行列、 $P=R(q)$
 313: カモーメント検出手段
 314: 関節アクチュエータのドライバ
 315: 関節速度検出手段
 316: 関節位置検出手段
 317: マニピュレータのダイナミクス
 318: マニピュレータが接触する環境のダイナミクス
 319: ローパスフィルタ
 320: $d^{-1}P/dt$ のフィードバックゲインLV

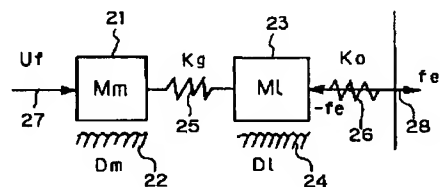
【図1】



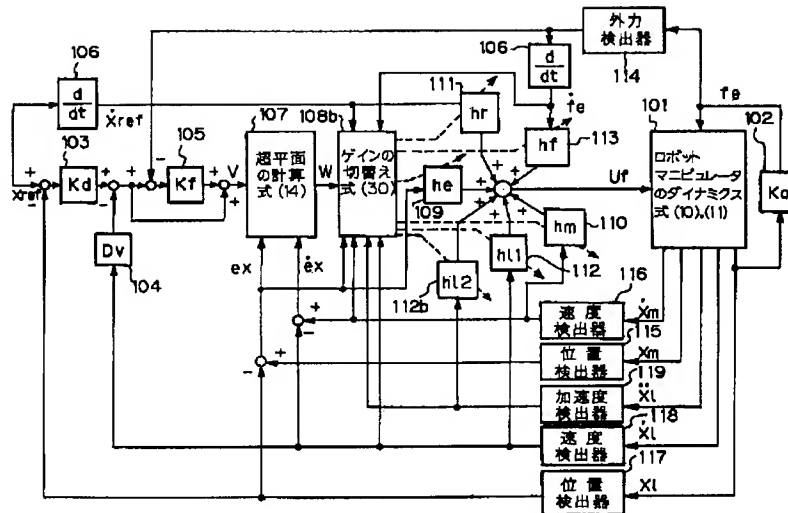
【図4】



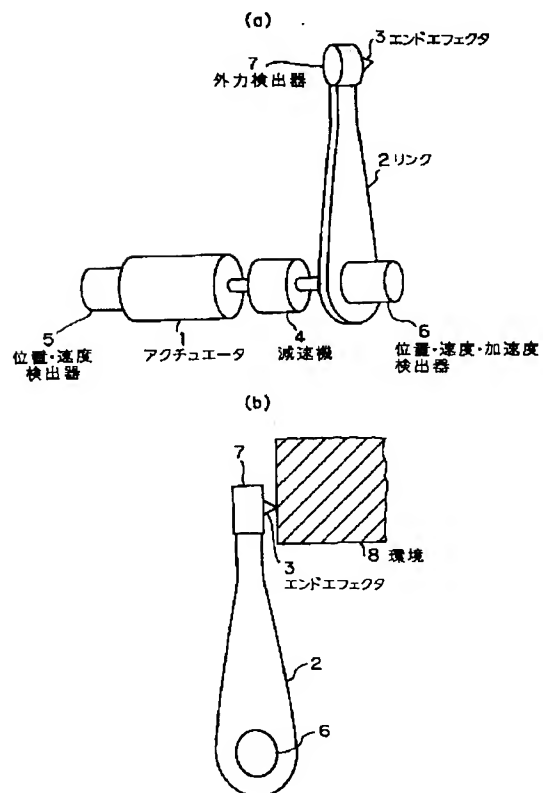
【図5】



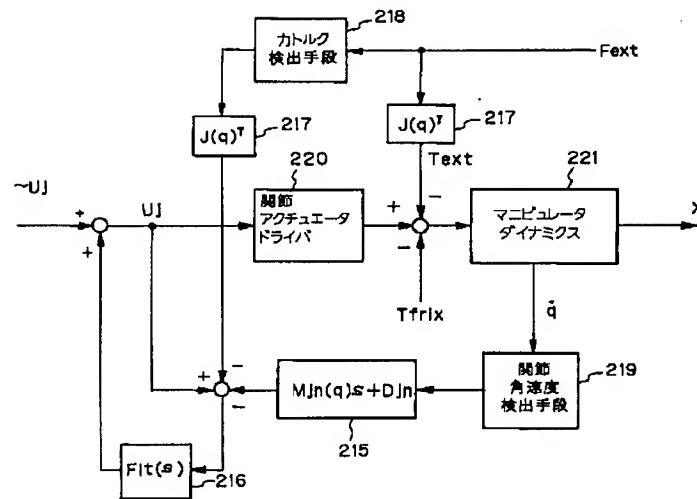
【図2】



【図3】



【図6】



【図7】

